doi:10.13866/j.azr.2019.01.17

西宁盆地4种草本和灌木植物降盐效应试验研究①

李淑霞[1,2,3], 刘亚斌[1,2,3], 钟 鹏[4], 余冬梅[1,2], 胡夏嵩[1,2,4], 杨幼清[1,2,3]

(1. 中国科学院青海盐湖研究所,中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室,青海 西宁 810008;
2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室,青海 西宁 810008; 3. 中国科学院大学,北京 100049;
4. 青海大学,青海 西宁 810016)

摘 要: 以西宁盆地长岭沟流域自建试验区为研究区,筛选出适宜当地气候条件下生长的2种灌木植物柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)、霸王〔*Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim.〕和2种草本植物细茎冰草(*Agropyron trachycaulum* cv. Slender)、紫花苜蓿(*Medicago sativa* Linn.)作为试验供试种,在试验区对4种植物采用单一种植和组合种植方式,探讨2种种植条件下植物根系在边坡地表以下垂直方向上土体中K^+、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^-、HCO_3^-、CO_3^{2-}等8种易溶盐离子含量及其变化特征,评价了区内2种草本和2种灌木植物降低边坡土体盐分的能力。结果表明:单一种植细茎冰草、紫花苜蓿、柠条锦鸡儿、霸王对边坡土体中SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Na^+具有显著降低作用,草本与灌木组合Ⅰ(柠条锦鸡儿+紫花苜蓿+细茎冰草组合)和草本与灌木组合Ⅱ(霸王+紫花苜蓿+细茎冰草组合)对边坡土体中SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、Na^+表现出显著降低作用;紫花苜蓿的降盐效果相对较为显著、其次为柠条锦鸡儿和细茎冰草,霸王的降盐效果不及前者显著;草本与灌木组合Ⅱ的降盐效果相对显著于草本与灌木组合Ⅰ。

关键词: 植物降盐效应; 易溶盐离子; 全盐量; 单一种植; 组合种植; 西宁盆地

土壤盐渍化是一种重要的环境风险,已成为国内外专家学者共同关注的生态和环境问题[1]。它不仅影响区域生态环境的稳定性和农作物产量,还制约社会、经济的发展,对人类生产生活带来严重危害[2-6]。因此,利用合理措施改良土壤盐渍化现象已成为当前急需解决的关键科学问题之一。目前,土体盐渍化传统改良方法有物理改良方法、化学改良方法和生物改良方法[7],其中物理和化学改良方法具有一定效果,但也存在一定的副作用[8]。相比而言,生物改良方法略胜一筹,即利用耐盐植物直接种植,通过常规灌溉,不需任何附加条件和设施,将土壤盐分控制在植物根系土层以下的土体中[9]。采用生物措施具有投资少和见效快的特点,尤其是利用植物修复盐渍土,即植物在生长过程中减少地表蒸发,中和土壤碱性,改善土壤结构,防治盐分表聚,从而提高土壤肥力,使土壤生产力出现良性循环,达到有效改良盐渍土的目的[10-11]。

近年来,有关植物改良土体盐渍化机理与应用方面国内外学者开展了大量研究,并取得显著成果。Ravindrana 等[12-13]研究了碱蓬〔*Suseda salsa* (Linn.) Pall.〕、海马齿(*Sesuvium portulacastrum* L.)等耐盐植物对盐分的吸收作用,认为通过种植耐盐植物能有效降低土体盐分含量。Chaudhri 等[14]利用碱蓬属植物(*Suaeda fruticosa*)改良西巴基斯坦平原盐渍土和碱土,得出盐生植物对其根系周围土体的理论脱盐率达到2 697 kg·hm^{-2}。赵丹等[15]选取赖草〔*Leymus secalinu* (Georgi) Tzvel.〕、海韭菜(*Triglochin matitimum* L.)、毛穗赖草〔*Leymus paboanus* (Claus) Pilger〕、芦苇〔*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud〕等4种盐生植物,探讨了植物及其组合的降盐效果,结果表明距离根系0~50 cm土体平均含盐量相比距离50~100 cm土体分别降低7.63%、21.79%、44.40%和53.99%;4种盐生植物组合在地表以下垂直方向0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm深度处,土体含盐量分别相对素土相同深度处下降3.95%~49.01%、1.90%~59.61%、

① 收稿日期: 2018-05-03; 修订日期: 2018-09-12
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41572306,41162010);中国科学院"百人计划"资助项目(Y110091025);青海省自然科学基金资助项目(2014-ZJ-906)
作者简介: 李淑霞(1993-),女,硕士研究生,主要研究方向为环境岩土工程与工程地质. E-mail: lishuxia0607@sina.com
通讯作者: 胡夏嵩. E-mail: huxiasong@tsinghua.org.cn

39.62% ~71.20%。王丽艳等[16]通过大田试验对田菁〔*Sesbania cannabina*（Retz.）Poir.〕、紫花苜蓿（*Medicago sativa* Linn.）、苏丹草〔*Sorghum sudanense*（Piper）Stapf.〕、碱蓬〔*Suaeda salsa*（Linn.）Pall.〕4种耐盐植物生长期为2个月、3个月和5个月时，地表以下0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm深度处K^+、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^-、HCO_3^-、CO_3^{2-}等8种易溶盐离子进行测定，分析了种植4种耐盐植物的土体与对照组土体中易溶盐离子运移特征，认为种植耐盐植物对表层土壤具有明显脱盐效果。董积忠等[17]通过在田间小区种植盐地碱蓬〔*Suaeda salsa*（Linn.）Pall.〕得出，生长期分别为3个月和6个月，地表以下0~30 cm深度处土壤中平均含盐量较种植前下降了21.6%，相比无植被覆盖的裸地多下降11.4%。上述研究表明，利用植物改良土体盐碱化一方面具有绿化和美化环境作用，另一方面可有效降低土壤中盐分，且具有疏松土壤提高土壤肥力的作用。

通过分析可知，目前较多学者开展的研究未能结合植物种植方式来探讨其降盐效果，特别是通过植物组合来分析其降盐作用和降盐效果；其次，在已开展的植物降盐效果试验中，主要是对部分易溶盐离子进行分析，未体现出对8种易溶盐离子和全盐量的系统评价，尤其对于青藏高原东北部地区有关植物降盐作用方面的相关研究相对较少。本项研究针对青藏高原东北部寒旱环境条件下，通过自建试验区，采用单一种植和组合种植草本与灌木的方式，分析植物边坡垂直方向土体中K^+、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^-、HCO_3^-、CO_3^{2-}等8种易溶盐离子含量和全盐量；在此基础上，分析区内单一种植草本和灌木植物以及草本和灌木组合条件下降低边坡土体盐分的作用和贡献。该研究成果对于研究区以及与区内自然地理环境相类似的其他地区，利用植物有效防治边坡土体盐渍化，具有一定的理论和实际指导意义。

1 研究区概况

研究区位于青藏高原东北部与黄土高原西缘交接地带的西宁盆地[18]，区内及其周边地区广泛发育有黄土状盐渍土[19]，土体全盐量一般为0.3% ~3.5%[20]，主要为硫酸盐渍土，盐渍土总面积约7 665 km^2[21]。区内属大陆性高原半干旱气候，多年平均降水量约478 mm，多年平均蒸发量约1 683 mm[22]，且空间分布不均，表现为由东至西呈逐渐减小，夏季暴雨频繁，区内的全年降水量主要集中在6—9月，占全年降水量的65%以上，每年10月至翌年2月降水量约占全年的10%左右，3—5月降水量约占全年的25%[23]。区内日照时间相对较长，阳光辐射强，气温变化较明显，日温差大，年温差相对较小；年平均气温2~9 ℃，无霜期100~200 d[24]。研究区为西宁盆地长岭沟流域自建试验区，地理位置101°42′00″E，36°36′00″N，海拔2 200~2 900 m[25]。

2 试验材料与方法

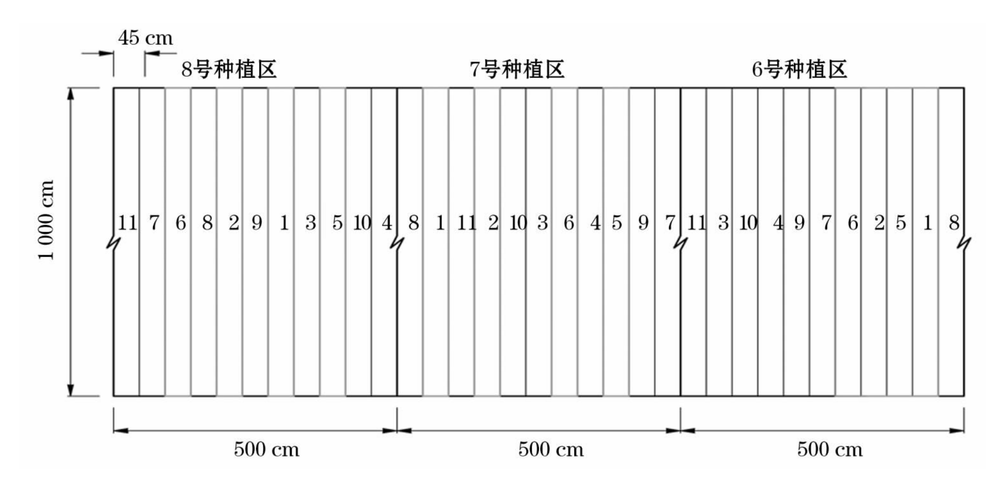
2.1 试验材料

筛选供试种植物的基本原则为：适应高原寒冷和干旱气候条件，具有发达根系生长迅速且能在短期内覆盖坡面[26]。基于此，筛选出2种草本植物紫花苜蓿和细茎冰草，2种灌木植物柠条锦鸡儿和霸王作为供试种。

2.2 试验方法

2.2.1 *试验区供试种种植方法* 试验于2016年6月在自建试验区开展种植试验。试验区共设8块种植区（以下分别称1~8号种植区），每块种植区面积5 m×10 m（长×宽）。其中，单一种植植物每个种植区平均分为11个种植小区，每个小区面积为0.45 m×10 m（长×宽）；相应地，组合种植区平均分为9个种植小区，每个小区面积为0.55 m×10 m（长×宽）。由于试验区坡向向南且为阳坡，每一种植小区的方向和坡体方向一致。试验区的排列方式采用随机完全区组设计法，将整个试验区划分成8个各自相对均匀的种植区，然后将每一种植区分成11个单一种植小区、9个组合种植小区，其中每个小区植物排列方式采用抽签法，分别将4种植物种植在不同的种植小区[27]。试验区植物采用喷灌，即每次喷灌时确保坡面未形成地表径流，以避免坡面地表土壤中的盐分随水流流失。因试验区为半干旱气候条件，在植物出苗前期原则上每天喷灌，有助于植物能正常出苗；待植物出苗后，根据边坡土壤干湿情况每3~5 d喷灌1次。本项研究选择其中的6个种植区进行种植试验（剩余2个种植区开展其他试验）。具体种植方案如下：

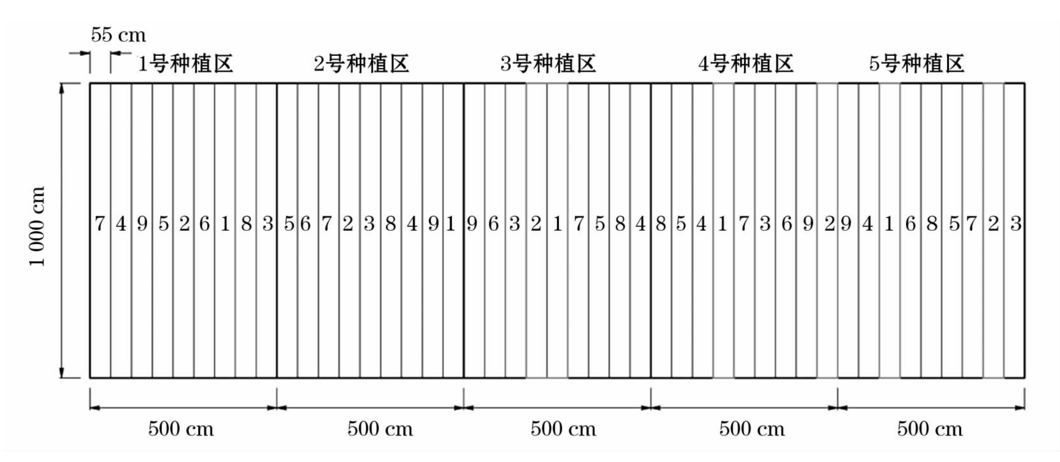
（1）植物单一种植：选取试验区内6号、7号和



注:1 为柠条锦鸡儿;2 为霸王;3 为红枸杞;4 为白刺;5 为紫花苜蓿;6 为细茎冰草;7 为芨芨草;8 为垂穗披碱草;9 为碱茅;10 为草地早熟禾;11 为对照组(未种植植物)。

图 1　试验区草本与灌木植物单一种植方案

Fig. 1　Single planting scheme of herbaceous and shrubby species in the test area



注:1 为紫花苜蓿 + 细茎冰草 + 柠条锦鸡儿;2 为紫花苜蓿 + 细茎冰草 + 霸王;3 为紫花苜蓿 + 细茎冰草 + 红枸杞;4 为紫花苜蓿 + 细茎冰草 + 白刺;5 为紫花苜蓿 + 垂穗披碱草 + 碱茅 + 草地早熟禾 + 柠条锦鸡儿;6 为紫花苜蓿 + 垂穗披碱草 + 碱茅 + 草地早熟禾 + 霸王;7 为紫花苜蓿 + 垂穗披碱草 + 碱茅 + 草地早熟禾 + 红枸杞;8 为紫花苜蓿 + 垂穗披碱草 + 碱茅 + 草地早熟禾 + 白刺;9 为对照组;本项试验所涉及的种植小区为其中的 1 号小区和 2 号小区。

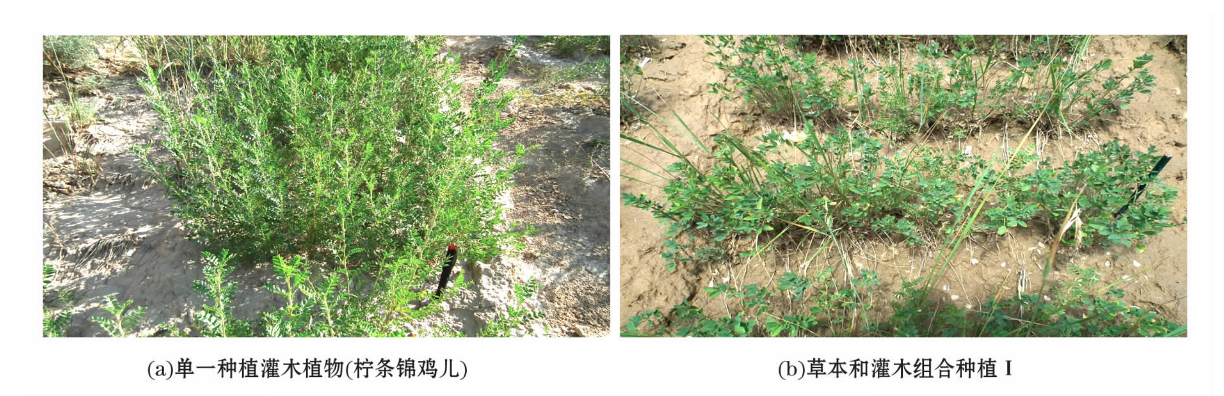
图 2　试验区草本与灌木组合种植方案

Fig. 2　Assemblage planting scheme for herbaceous and shrubby species in the test area

8 号种植区的其中 4 个小区进行单一种植柠条锦鸡儿、霸王、细茎冰草、紫花苜蓿 4 种植物(图 1),图中红色标记的 1 号、2 号、5 号、6 号小区为本试验所开展的 4 种单一种植草本和灌木植物的种植小区。种植灌木植物采用穴播方式,穴深为 3 ~ 4 cm,穴间距为 5 cm,每个穴中放入 3 粒种子;种植草本植物采用条播方式,条间距为 20 cm,种子埋深 2 ~ 3 cm,种子播种量为 3.8 ~ 20.1 $g \cdot m^{-2}$。

(2) 草本与灌木组合种植:设 2 个草本与灌木组合,分别为草本与灌木组合Ⅰ(柠条锦鸡儿 + 紫花苜蓿 + 细茎冰草组合)和草本与灌木组合Ⅱ(霸王 + 紫花苜蓿 + 细茎冰草组合),随机种植于 3 号、4 号和 5 号种植区的其中 2 个小区内(图 2),图中采用红色标记的 1 号、2 号小区为本次试验植物组合种植所在的种植小区。种植方式同前(图 3)。

2.2.2　试验区边坡土体取样方法　对区内种植前和种植 4 种单一植物及草本与灌木植物组合,在其生长期为 5 个月时分别采集边坡土体试样,以测试土体中的 CO_3^{2-}、HCO_3^-、SO_4^{2-}、Cl^-、K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 等 8 种易溶盐离子含量及其全盐量。试验中垂直方向土体采样方法为:在种植区从每个小区中间位置的坡顶、坡中与坡脚 3 处采用洛阳铲取样,即每个坡面在 3 个位置处取样,每一位置沿边坡地表以下垂直方向等间距采样,采样深度为 100 cm,采



(a)单一种植灌木植物(柠条锦鸡儿)　(b)草本和灌木组合种植 I

图 3　试验区草本和灌木植物生长情况

Fig. 3　Growth situation of herbaceous and shrubby species in the test area

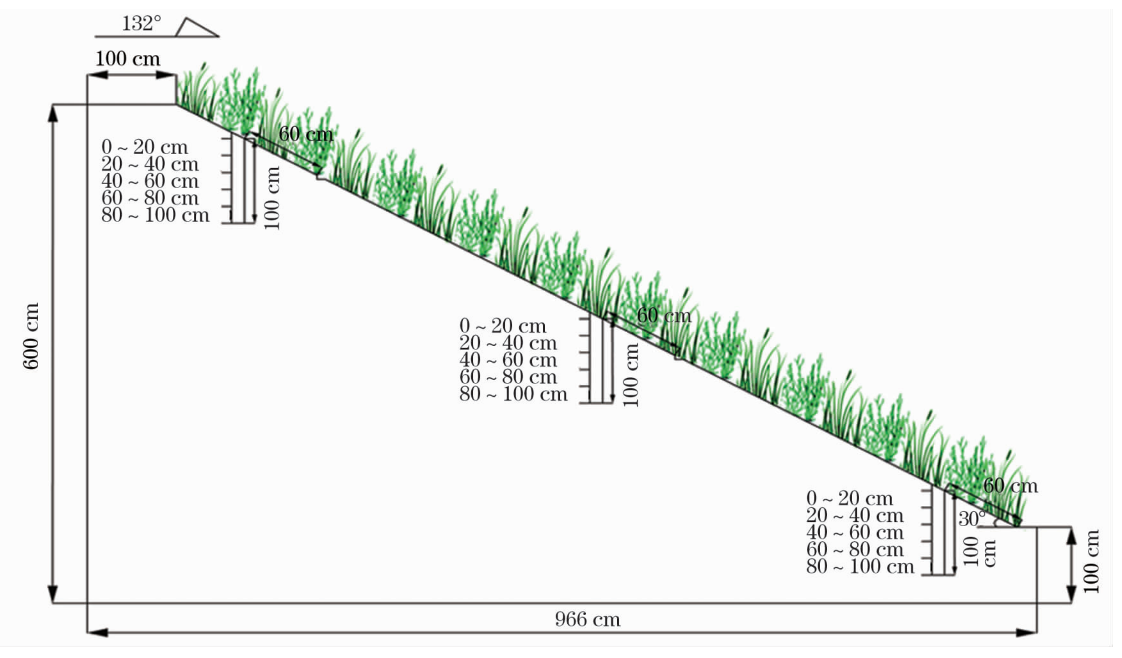


图 4　试验区边坡地表以下不同深度处土体试样采集方案示意图

Fig. 4　Schematic diagram of soil sample collection at different depths in the test area

样间距分别为边坡地表以下按 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm 共 5 个间距进行采样。试验区边坡地表以下 5 个不同深度处的土样位置如图 4 所示。在试验区原位采集试样过程中，对所采集的土体试样分别用自封袋包装，每个试样在野外取质量为 400 g 且做好标记。

2.2.3　*试验区易溶盐离子测定方法*　对区内 4 种植物采用单一种植和草本与灌木组合种植方式，测定其根系在边坡地表以下垂直方向土体中 K^+、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^-、HCO_3^-、CO_3^{2-} 等 8 种易溶盐离子含量和植物茎叶及根系部分中全盐量，其测试方法如下：

边坡土体中全盐量测定方法为：将所采土体试样浸泡于蒸馏水中，土体试样中可溶盐溶解于蒸馏水中，然后提取其浸提液，经过烘干得到烘干残渣，烘干残渣中除去有机质，其量即为可溶盐的全盐量[28]。边坡土体中易溶盐离子测定方法为：CO_3^{2-}、HCO_3^- 采用双指示剂中和滴定法，Cl^- 采用硝酸银滴定法，SO_4^{2-} 采用 EDTA 间接滴定法，Na^+、K^+ 采用火焰光度法，Ca^{2+}、Mg^{2+} 采用 EDTA 络合滴定法[29]。

3　试验结果与分析

3.1　植物边坡土体易溶盐离子含量变化

对试验区种植前植物边坡及种植植物边坡，其地表以下垂直方向 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm 5 个位置处，土体中 CO_3^{2-}、HCO_3^-、Cl^-、SO_4^{2-}、K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 等 8

表 1 试验区植物种植前后边坡土体易溶盐离子含量

Tab. 1 Reduction of soluble salt ion content in slope soil before and after planting vegetation in the test area

植物种类	不同易溶盐离子含量降低幅度/%						
	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
紫花苜蓿	1.88	12.42	48.88	46.21	44.07	49.00	21.38
细茎冰草	-39.70	-20.44	11.27	35.36	42.27	0.12	-2.87
柠条锦鸡儿	-43.87	35.15	46.33	26.13	56.53	41.82	10.28
霸王	32.53	9.67	15.86	-29.33	8.56	24.50	20.11
组合 I	-3.79	-15.58	39.00	28.82	23.13	38.71	32.59
组合 II	16.24	28.02	76.71	60.72	27.11	79.21	68.53

注:① 种植植物后土体易溶盐离子降低幅度是指种植前与种植后土体易溶盐离子含量差值与种植前土体易溶盐离子含量的比值,其计算公式为土体易溶盐离子降低幅度 =(种植前土体易溶盐离子含量 - 种植后土体易溶盐离子含量)/种植前土体易溶盐离子含量 ×100%[30]。下同。② 组合 I 为柠条锦鸡儿 + 紫花苜蓿 + 细茎冰草组合;③ 组合 II 为霸王 + 紫花苜蓿 + 细茎冰草组合,下同;④ 计算所用易溶盐离子含量为边坡地表以下不同深度处的平均值;⑤ 因区内边坡土体易溶盐离子测试过程中均未测出 CO_3^{2-} 含量,故在此不对 CO_3^{2-} 进行分析。

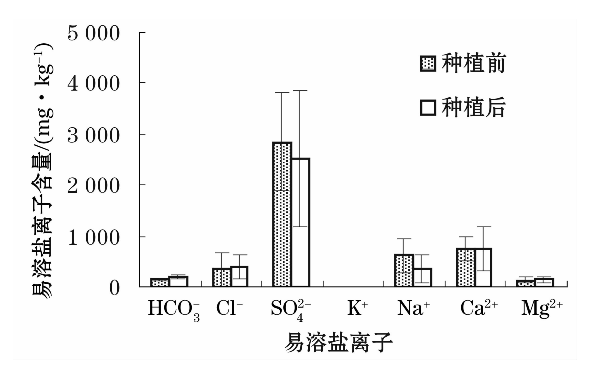


图 5 试验区种植细茎冰草前后边坡土体易溶盐离子含量变化

Fig. 5 Change of the content of soluble salt ion in slope soil before and after planting *Agropyron trachycaulum* (Linn.) in the test area

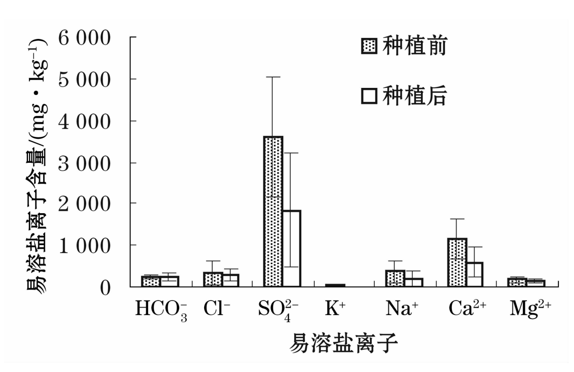


图 6 试验区种植紫花苜蓿前后边坡土体易溶盐离子含量变化

Fig. 6 Change of the content of soluble salt ion in slope soil before and after plantibg *Medicago sativa* L. in the test area

种易溶盐离子进行测定。根据试验结果,区内植物种植前后边坡土体中的易溶盐离子含量降低幅度计算结果如表 1 所示。从表 1 可知,区内采用单一种植方式和组合种植方式,均具有显著降低边坡土体中易溶盐离子含量的作用,且因种植方式不同,边坡土体中易溶盐离子含量的降低幅度亦表现出差异性。

3.1.1 单一种植植物边坡土体易溶盐离子含量变化 区内细茎冰草种植小区边坡土体 7 种易溶盐离子含量与种植前细茎冰草小区边坡土体相比,种植细茎冰草小区边坡土体中 SO_4^{2-}、Na^+、Ca^{2+}、K^+ 4 种离子含量均降低,其中 SO_4^{2-} 含量由 2 841.7 mg·kg^{-1}降低至 2 521.6 mg·kg^{-1},Na^+ 含量由 622.0 mg·kg^{-1}降低至 359.1 mg·kg^{-1},且降低幅度较为明显(图 5),说明种植细茎冰草对于降低边坡土体中 SO_4^{2-} 和 Na^+较为显著。

区内紫花苜蓿种植小区边坡土体中的 7 种易溶盐离子含量与种植前紫花苜蓿小区边坡土体对比,种植紫花苜蓿小区边坡土体中 7 种易溶盐离子含量均降低,其中 SO_4^{2-} 含量由 3 608.7 mg·kg^{-1}降低至 1 844.6 mg·kg^{-1},Ca^{2+} 含量则由 1 158.3 mg·kg^{-1}降低至 590.8 mg·kg^{-1},降低幅度较明显(图 6),这在一定程度上反映出区内种植紫花苜蓿对于降低土体中 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+}效果较显著。

区内柠条锦鸡儿种植小区边坡土体 7 种易溶盐离子含量与种植前柠条锦鸡儿小区的边坡土体相比,种植柠条锦鸡儿后边坡土体易溶盐离子中 Cl^-、SO_4^{2-}、K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 6 种离子含量均呈降低趋势,其中 SO_4^{2-} 含量由 3 327.5 mg·kg^{-1}降低至 1 786.0 mg·kg^{-1},Na^+ 含量由 438.3 mg·kg^{-1}降低至 190.5 mg·kg^{-1},降低幅度较明显,分别为 46.33% 和 56.53%(图 7),说明区内种植柠条锦鸡儿对于降低边坡土体 SO_4^{2-} 和 Na^+效果较显著。

区内霸王种植小区边坡土体7种易溶盐离子含量与种植前霸王小区的边坡土体相比,种植霸王后边坡土体除K^{+}外其他6种离子含量均呈降低的趋势,其中SO_4^{2-}含量由3 339.7 mg·kg^{-1}降低至2 809.9 mg·kg^{-1},Ca^{2+}含量则由831.2 mg·kg^{-1}降低至627.6 mg·kg^{-1},降低幅度分别为15.86%和24.50%(图8),说明种植霸王对于降低土体SO_4^{2-}和Ca^{2+}效果较显著。

3.1.2 组合种植边坡土体易溶盐离子含量变化 试验区草本与灌木组合Ⅰ边坡地表以下垂直方向土体易溶盐离子类型与含量间关系如图9所示。从图9可知,草本与灌木组合Ⅰ种植区边坡地表以下土体7种易溶盐离子含量与种植前草本与灌木组合Ⅰ小区边坡土体对比,种植草本与灌木组合Ⅰ小区边坡土体中SO_4^{2-}、K^{+}、Na^{+}、Ca^{2+}、Mg^{2+}5种离子含量均呈降低趋势,其中SO_4^{2-}含量由3 155.6 mg·kg^{-1}降低至1 924.9 mg·kg^{-1},Ca^{2+}含量则由948.1 mg·kg^{-1}降低至581.1 mg·kg^{-1},降低幅度分别为39.00%和38.71%,反映出种植组合Ⅰ对于降低边坡土体SO_4^{2-}和Ca^{2+}效果较显著。

试验区草本与灌木组合Ⅱ其边坡地表以下垂直方向土体易溶盐离子类型与含量间关系如图10所示。由图10可知,草本与灌木组合Ⅱ种植区边坡土体7种易溶盐离子含量与种植前草本与灌木组合Ⅱ小区边坡地表以下土体相比,种植草本与灌木组合Ⅱ小区边坡土体中7种易溶盐离子含量均呈降低趋势,其中SO_4^{2-}含量由3 172.9 mg·kg^{-1}降低至738.9 mg·kg^{-1},Ca^{2+}含量则由956.0 mg·kg^{-1}降低至198.7 mg·kg^{-1},降低幅度明显,分别为76.71%和79.21%,说明种植组合Ⅱ对于降低区内

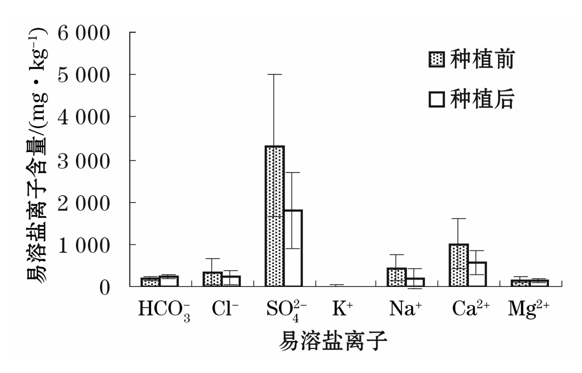


图7 试验区种植柠条锦鸡儿前后边坡土体易溶盐离子含量变化

Fig.7 Change of the content of soluble salt ion in slope soil before and after planting *Caragana korshinskii* Kom. in the test area

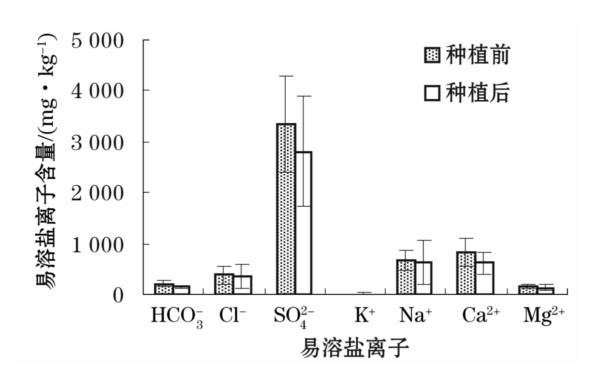


图8 试验区种植霸王前后边坡土体易溶盐离子含量变化

Fig.8 Change of the content of soluble salt ion in slope soil before and after planting *Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim. in the test area

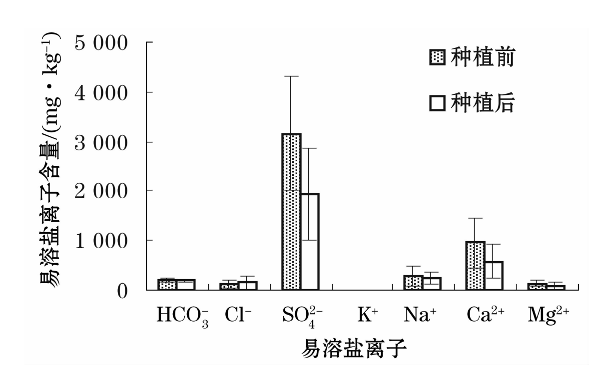


图9 试验区种植组合Ⅰ前后边坡土体易溶盐离子含量变化

Fig.9 Change of the content of soluble salt ion in slope soil before and after planting assemblage Ⅰ in the test area

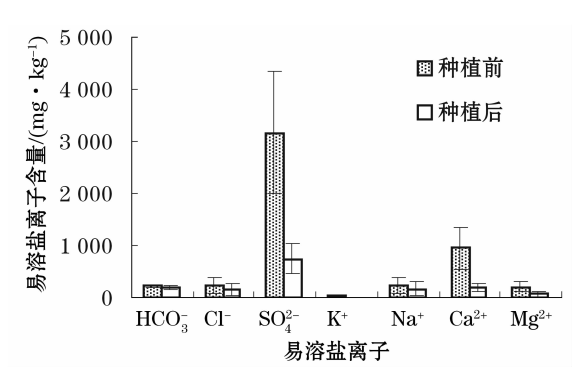


图10 试验区种植组合Ⅱ前后边坡土体易溶盐离子含量变化

Fig.10 Change of the content of soluble salt ion in slope soil before and after planting assemblage Ⅱ in the test area

边坡土体SO_4^{2-}和Ca^{2+}具有显著作用。

3.2 种植植物边坡土体降盐效应

3.2.1 单一种植植物边坡土体全盐量变化 分析区内4种单一种植植物细茎冰草、紫花苜蓿、柠条锦

表 2　试验区种植 4 种植物与 2 种植物组合边坡土体全盐量计算结果

Tab. 2　Total salt reduction in slope soil covered with four different plant species and two plant assemblages in the test area

边坡取样深度/cm	单一种植降低幅度/%				组合种植降低幅度/%		对照
	细茎冰草	紫花苜蓿	柠条锦鸡儿	霸王	组合Ⅰ	组合Ⅱ	
0~20	20.2	44.9	47.6	-3.7	47.2	76.2	-89.97
20~40	14.5	52.6	42.3	15.5	26.0	74.6	-39.82
40~60	16.2	42.8	28.3	22.0	37.2	66.6	-39.29
60~80	10.5	45.8	46.7	7.8	30.9	62.0	-26.53
80~100	26.8	34.4	43.4	37.3	28.3	66.0	-68.92

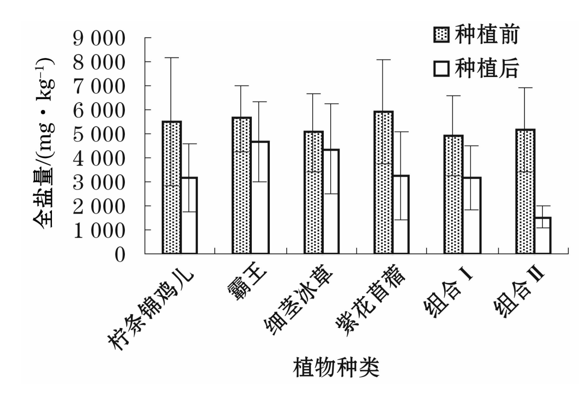


图 11　试验区种植植物前后边坡地表以下垂直方向土体全盐量变化

Fig. 11　Total soil salt content along the vertical direction before and after planting vegetation in the test area

鸡儿、霸王,其在边坡地表以下 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 5 个深度处垂直方向土体全盐量与种植前边坡相应位置处的全盐量,计算得出,区内边坡不同深度处土体全盐量的降低幅度(表 2)。

对表 2 分析可知,区内单一种植植物边坡地表以下垂直方向土体全盐量降低幅度,由大至小依次为:紫花苜蓿、柠条锦鸡儿、细茎冰草、霸王,即单一种植前后边坡土体全盐量相差较为显著的是紫花苜蓿,其次为柠条锦鸡儿和细茎冰草,霸王相对不显著(图 11)。由图 11 可知,边坡地表以下 0~40 cm,4 种单一种植植物其边坡降盐效果较明显,边坡土体全盐量降低幅度相对较大,说明单一种植植物对区内边坡浅层土体的降盐效果较显著。张立宾等[31]通过种植柽柳研究了该植物对滨海盐渍土的改良效果,结果表明种植柽柳后促进了土壤脱盐,在生长期为 2 a 时地表以下 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 处土壤脱盐率分别为 9.86%、10.66%、4.86%,其中对 0~40 cm 表层土壤脱盐效果较为显著,该结果与本项研究的结果相类似。

3.2.2　组合种植植物边坡土体全盐量变化　通过对区内 2 种草本与灌木植物组合条件下,边坡地表以下 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 等 5 个深度处,其垂直方向土体全盐量与种植前边坡相应位置处全盐量对比可知,种植草本与灌木组合边坡地表以下 0~100 cm 处土体全盐量均表现出降低的变化趋势(表 2)。区内种植草本与灌木组合Ⅰ在 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 等 5 个深度处,相对于种植前植物边坡相同深度处土体全盐量降低幅度分别为 47.2%、26.0%、37.2%、30.9%、28.3%;相应地,种植草本与灌木组合Ⅱ在 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 等 5 个深度处,相对于种植前边坡相同深度处土体全盐量降低幅度分别为 76.2%、74.6%、66.6%、62.0%、66.0%。通过上述分析可知,组合种植边坡地表以下土体全盐量降低幅度由大至小依次为:草本与灌木组合Ⅱ、草本与灌木组合Ⅰ,这在一定程度上反映出草本与灌木组合Ⅱ降盐效果相对优于草本与灌木组合Ⅰ。

3.2.3　单一种植与组合种植条件下边坡土体全盐量对比分析　由图 12 可知,采用单一种植和组合种植 2 种方式均具有显著降低边坡土体盐分的作用。其中,种植柠条锦鸡儿、紫花苜蓿和细茎冰草与种植草本和灌木组合Ⅰ相比,边坡地表以下 0~40 cm 深度处柠条锦鸡儿、紫花苜蓿、草本与灌木组合Ⅰ种植区边坡土体全盐量分别为 3 092.5 mg·kg^{-1}、3 227.5 mg·kg^{-1}、4 229.2 mg·kg^{-1},在 40~100 cm 深度处柠条锦鸡儿、紫花苜蓿、草本与灌木组合Ⅰ种植区边坡全盐量分别为 3 263.9 mg·kg^{-1}、3 300.6 mg·kg^{-1}、2 481.1 mg·kg^{-1},说明在边坡地表以下 0~40 cm深度处种植柠条锦鸡儿和紫花

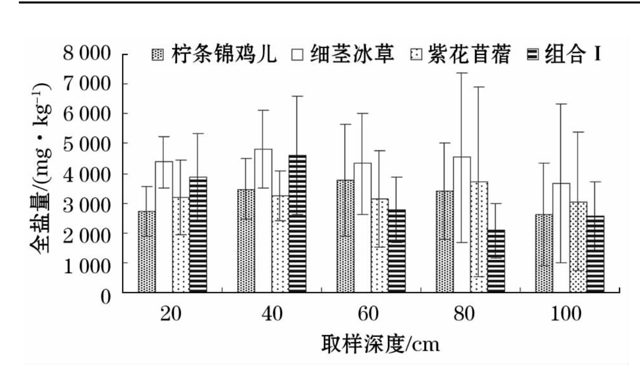


图 12 试验区不同深度单一种植与草本与灌木组合 I 全盐量变化

Fig. 12 Change of the total salt content under single planting and assemblage Ⅰ of herbs and shrubs with the depth in the test area

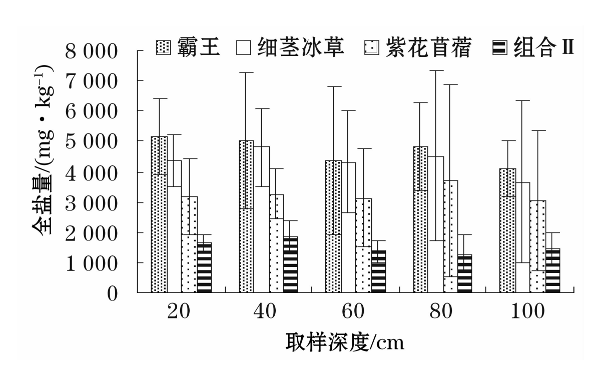


图 13 试验区不同深度单一种植与草本与灌木组合Ⅱ全盐量变化

Fig. 13 Change of the total salt content under single planting and assemblage Ⅱ of herbs and shrubs with the depth in the test area

苜蓿降盐效果较草本与灌木组合Ⅰ相对显著，40～100 cm 深度处草本与灌木组合Ⅰ降盐效果较柠条锦鸡儿与紫花苜蓿显著。边坡地表以下 0～100 cm 深度处细茎冰草的全盐量均较大，平均达到 4 338.7 $mg \cdot kg^{-1}$，说明细茎冰草降盐效果不及柠条锦鸡儿、紫花苜蓿、草本与灌木组合Ⅰ显著。

由图 13 可知，区内种植草本与灌木组合Ⅱ降盐效果相对显著于单一种植霸王、紫花苜蓿与细茎冰草，表现为在边坡地表以下 0～100 cm 深度处，种植草本与灌木组合Ⅱ、霸王、紫花苜蓿和细茎冰草土体全盐量平均降低幅度为 69.1%、15.8%、44.1%、17.6%。由此可知，区内降盐效果由大至小依次为：草本与灌木组合Ⅱ、紫花苜蓿、细茎冰草、霸王。

3.3 草本与灌木植物吸盐效应

土壤盐分含量高低的分布与植被郁闭度、地表覆盖度、根系生长、凋落物等有关[32]。因不同类型

表 3 试验区单一种植植物吸收边坡土体单位面积盐量的计算结果

Tab. 3 Calculated results of salt content in slope soil per unit area under single planting in the test area

植物类型	植株全盐量 /($mg \cdot kg^{-1}$)	总干重 /kg	单位面积植株干重 /($kg \cdot m^{-2}$)	单位面积植株吸收盐量 /($mg \cdot m^{-2}$)
柠条锦鸡儿	47 470.0	3.676 8	0.817 1	38 786.15
紫花苜蓿	67 744.7	2.773 2	0.616 3	41 748.80
细茎冰草	52 410.0	1.427 0	0.317 1	16 619.79
霸王	138 605.0	0.520 0	0.115 6	16 016.58

注：① 植物全盐量包括植物茎叶部分和根系部分全盐量总和；② 总干重是指 6 号种植区和 7 号种植区中植物地上茎叶部分和地下根系部分干重的总和；③ 单位面积植株干重是指每个种植小区单位面积上地上茎叶部分和地下根系部分总干重，计算方法为植物总干重与种植该植物的小区面积的比值〔种植小区面积为 0.45 m×10 m(长×宽)〕；④ 单位面积植株吸收盐量是指每个种植小区单位面积一株植物地上茎叶部分和地下根系部分吸收的盐量，计算方法为植株总含盐量与单位面积植株干重的乘积。

植物降低土体盐分机理不同，其降盐效果具有一定差异性[33]。不同植物地表覆盖度不同，对盐分抑制效果亦存在差别，即植物覆盖度较高时，可有效减小表层土壤水分蒸发，从而控制盐分向上运动，表现为土壤表层全盐含量较低[34]。

由表 3 可知，试验区 4 种单一种植草本和灌木其单位面积内吸收土体中的盐量，紫花苜蓿单位面积吸收边坡土体盐量相对较多，为 38 786.15 mg，其次为柠条锦鸡儿和细茎冰草，分别为 38 786.15 mg、16 619.79 mg；霸王单位面积吸收边坡土体盐量相对较少，为 16 016.58 mg。这与本文单一种植植物后边坡土体全盐量降低幅度由大至小的变化顺序表现出一致的变化规律，即依次为紫花苜蓿、柠条锦鸡儿、细茎冰草、霸王。这在一定程度上反映出区内单一种植植物后，植物单位面积吸收的盐量愈多，土体全盐量降低幅度亦愈高。

4 讨 论

4.1 植物对于土体中易溶盐离子的吸收作用

试验区种植细茎冰草、紫花苜蓿、柠条锦鸡儿和霸王 4 种植物，对于边坡土体 HCO_3^-、Cl^-、SO_4^{2-}、K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 等 7 种易溶盐离子均表现出不同程度的降低作用，且土体中易溶盐离子变化不同。该研究结果与单娜娜等[35]开展的准噶尔盆地西北缘沙拐枣(*Calligonum arborescens* Litv.)、胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*

L.)、四翅滨藜(*Atriplex canescens* A. Mey)、梭梭〔*Haloxylon ammodendron*(C. A. Mey.) Bunge〕、柽柳(*Tamarix chinensis* Lour.)6 种不同盐生植物种植后,土壤盐分变化研究所得到的易溶盐离子变化规律相类似。由表 1 可知,区内 2 种组合种植条件下边坡土体 7 种易溶盐离子的降低幅度均较大,说明组合种植植物对于边坡土体易溶盐离子降低效果较为显著。此外,表 1 中部分易溶盐离子含量降低幅度为负值,主要归因于植物对离子有选择性吸收的特性,反映出该植物对相应的离子吸收能力较弱,同时存在水盐运移现象,故在一定程度上使得易溶盐离子存在聚集现象。

4.2 植物对于全盐量的吸收作用

单一种植 4 种植物后边坡土体全盐量呈现出较为显著的降低趋势,尤其在边坡地表以下 0 ~ 40 cm 处土体全盐量降低幅度较大,说明单一种植植物对边坡表层土体降盐效果相对较为显著。该研究结果与黄丽萍等[36]、张蛟等[37]、祁通等[38]学者的研究结果相类似。种植紫花苜蓿边坡土体全盐量降低幅度相对较大,其次为柠条锦鸡儿和细茎冰草,种植霸王边坡土体全盐量降低幅度相对较小,该顺序与 4 种植物吸收边坡土体盐量大小顺序一致,这在一定程度上反映出区内单一种植植物后,植物单位面积吸收的盐量愈多,土体全盐量降低幅度亦愈高。本项研究中霸王降盐效果相对不及其他 3 种植物显著,其原因主要为试验区霸王生长情况相对不及柠条锦鸡儿、紫花苜蓿、细茎冰草,且种植试验边坡上单位面积植株数量较其他 3 种少;有关其他方面原因还有待于进一步研究。

4.3 灌溉措施对试验土体的盐分影响

野外试验区植物种植生长过程中,采用喷灌措施,即每次喷灌时确保坡面未形成地表径流,以避免坡面地表土壤中的盐分随水流流失。此外,在试验区植物种植时,按照试验种植方案留出其中的一块未种植植物小区作为对照组,5 个月后通过测量对照组小区边坡土体盐分含量,计算得出对照组土体全盐量降低幅度在 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm 处分别为 -89.97%、-39.82%、-39.29%、-26.53%、-68.92%(表 2),说明对照组小区土体全盐量在 5 个月后,并未随降雨或者灌溉发生盐分流失现象。该研究结果与刘迁迁等[39]、胡家帅等[40]、王海霞等[41]、李文昊等[42]的研究结果相类似,即通过灌溉土体不产生盐分流失现象,且土体全盐量逐渐增加,特别是表层土体全盐量增加较为显著。因此,在本项研究中,除对照组外其余种植小区全盐量逐渐降低主要归因于植物的吸盐效应,而不是因灌溉或者降雨导致盐分流失。

5 结 论

(1) 区内单一种植细茎冰草、紫花苜蓿、柠条锦鸡儿对降低边坡土体中 SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Na^+ 和 K^+ 具有显著作用;单一种植霸王、种植草本与灌木组合 Ⅰ 和草本与灌木组合 Ⅱ,表现出对边坡土体 SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+} 具有显著降低作用。

(2) 区内单一种植霸王、柠条锦鸡儿、紫花苜蓿和细茎冰草 4 种植物及组合种植植物后,边坡土体全盐量均表现出显著降低特征,其中单一种植紫花苜蓿降盐效果较为显著,其次为柠条锦鸡儿和细茎冰草,霸王降盐效果相对不显著;草本与灌木组合 Ⅱ 降盐效果显著优于草本与灌木组合 Ⅰ。

(3) 区内草本与灌木组合 Ⅰ 和组合 Ⅱ 降盐效果相对优于单一种植霸王、柠条锦鸡儿、紫花苜蓿和细茎冰草 4 种植物,因此,组合种植植物对于降低边坡土体全盐量表现出较为显著的效果。

参考文献(References):

〔1〕 杨东. 秸秆还田模式对滨海盐渍土的改良效果研究〔D〕. 泰安:山东农业大学,2017.〔Yang Dong. Study on the Effect of Straw Return on Coastal Saline Soil〔D〕. Tai'an:Shandong Agricultural University,2017.〕

〔2〕 赵宣,韩霁昌,王欢元,等. 盐渍土改良技术研究进展〔J〕. 中国农学通报,2016,32(8):113 - 116.〔Zhao Xuan,Han Jichang,Wang Huanyuan,et al. Research progress of saline soil improvement technology〔J〕. Chinese Agricultural Science Bulletin,2016,32(8):113 - 116.〕

〔3〕 胡宗英,孙泽威. 土壤盐渍化及其危害的研究进展〔J〕. 安徽农业科学,2013,41(33):12 888 - 12 890.〔Hu Zongying,Sun Zewei. Research advance of soil salinization and its damage〔J〕. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2013,41(33):12 888 - 12 890.〕

〔4〕 Feng J,Wang J,Fan P,et al. High-throughput deep sequencing reveals that microRNAs play important roles in salt tolerance of euhalophyte Salicornia europaea〔J〕. BMC Plant Biology,2015,15(1):63.

〔5〕 Patra J K,Das S K,Thatoi H,et al. Phytochemical profiling and bioactivity of a mangrove plant,*Sonneratia apetala*,from Odisha

Coast of India[J]. Chinese Journal of Integrative Medicine, 2015, 21(4): 274 – 285.

[6] Kachout S, Mansoura B, Ennajah A, et al. Effects of metal toxicity on growth and pigment contents of annual halophyte[J]. International Journal of Environmental Research, 2015, 9(2): 613 – 620.

[7] 李建国,濮励杰,朱明,等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1 233 – 1 245. [Li Jianguo, Pu Lijie, Zhu Ming, et al. The present situation and hot issues in the salt-affected soil research[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1 233 – 1 245.]

[8] 赵振勇,张科,王雷,等. 盐生植物对重盐渍土脱盐效果[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1 420 – 1 425. [Zhao Zhenyong, Zhang Ke, Wang Lei, et al. Desalination effect of halophytes in heavily salinized soil of Karamay, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(5): 1 420 – 1 425.]

[9] 罗廷彬,任崴,谢春虹. 新疆盐碱地生物改良的必要性与可行性[J]. 干旱区研究, 2001, 18(1): 46 – 48. [Luo Tingbin, Ren Wei, Xie Chunhong. Necessity and feasibility of biotic improving the saline and alkaline land in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2001, 18(1): 46 – 48.]

[10] 董宁,康立娟. 鸡腿蘑菌糠对苏打盐渍土改良效果及大豆生长发育的影响[J]. 吉林农业, 2011(4): 82 – 83. [Dong Ning, Kang Lijuan. Effects of coprinus comatus on the improvement of soda saline soil and the growth and development of soybean[J]. Jilin Agricultural, 2011(4): 82 – 83.]

[11] 王善仙,刘宛,李培军,等. 盐碱土植物改良研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(24): 1 – 7. [Wang Shanxian, Liu Wan, Li Peijun, et al. Advances of researches in plant-improvement of saline-alkaline soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(24): 1 – 7.]

[12] Ravindrana K C, Venkatesana K, Balakrishnana V, et al. Restoration of saline land by halophytes for Indian soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39(10): 2 661 – 2 664.

[13] Rabhi M, Ferchichi S, Jouini J, et al. Phytodesalination of a salt affected soil with the halophyte *Sesuvium portulacastrum* L. to arrange in advance the requirements for the successful growth of a glycophytic crop[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(17): 6 822 – 6 828.

[14] Chaudhri I I, Shah B H, Naqvi N, et al. Investigations on therole of Suaeda fruticosa Forsk in reclamation of saline and alkaline soils in the west Pakistan plains[J]. Plant and Soil, 1964, 21(1): 1 – 7.

[15] 赵丹,余冬梅,胡夏嵩,等. 青海柴达木盆地大柴旦盐湖区盐生植物降盐效应[J]. 盐湖研究, 2016, 24(4): 37 – 47. [Zhan Dan, Yu Dongmei, Hu Xiasong, et al. The bio-desalinization effect by halophytes in Da Qaidam Salt Lake area[J]. Journal of Salt Lake Research, 2016, 24(4): 37 – 47.]

[16] 王丽艳,潘洁,肖辉,等. 种植耐盐植物对滨海盐碱地土壤盐分的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(5): 226 – 231. [Wang Liyan, Pan Jie, Xiao Hui, et al. Effect of soluble salt on planting salt-tolerant plants of coastal saline soil[J]. North China Agricultural Journal, 2014, 29(5): 226 – 231.]

[17] 董积忠,尹传华,王海孝,等. 两种盐生植物生物移盐能力及土壤改良效果比较[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(1): 124 – 128. [Dong Jizhong, Yin Chuanhua, Wang Haixiao, et al. Comparison of two species of halophyte in removing and reducing soil salinity from saline soil[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2014, 51(1): 124 – 128.]

[18] 苏旭,杨丽萍,邹海宁. 西宁市区土层剪切波速随深度变化特征[J]. 高原地震, 2009, 21(1): 12 – 16. [Su Xu, Yang Liping, Zou Haining. Character istics of shearing wave velocity changed with depth of soil layer in Xi'ning urban area[J]. Plateau Earth Quake Research, 2009, 21(1): 12 – 16.]

[19] 谢承陶. 盐渍土改良原理与作物抗性[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1993. [Xie Chengtao. Principles of Salt-affected Soil Amelioration and Crop Resistance[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1993.]

[20] 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京:科学出版社, 1993: 85 – 112. [Wang Zunqin. Chinese Salty Soil[M]. Beijing: Science Publishing House, 1993: 85 – 112.]

[21] 裴浩. 西宁市水资源优化配置研究[D]. 邯郸:河北工程大学, 2012. [Pei Hao. Study on the Water Resource Optimize-allocation of Xining City[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2012.]

[22] 韩化安. 青海西宁盆地水文地质条件[J]. 水文地质工程地质, 1959(2): 10 – 13. [Han Hua'an. Hydrogeological conditions Xining basin[J]. Hydrogeological Engineering Geology, 1959(2): 10 – 13.]

[23] 王颖华,张鑫. 西宁市降水量特征及变化趋势分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(5): 156 – 160. [Wang Yinhua, Zhangxin. Analysis on the characteristic and change trend of precipitation in Xi'ning City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(5): 156 – 160.]

[24] 王希娟,唐红玉,张景华. 近 40 年青海东部春季降水变化特征及小波分析[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 21 – 25. [Wang Xijuan, Tang Hongyu, Zhang Jinghua. The evolvement characteristics and wavelet analysis of spring precipitation of last 40 years in East Qinghai[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(3): 21 – 25.]

[25] 汪绍铭. 青海东部农业地区气候、生态环境及治理对策初探[J]. 青海环境, 1989(3): 57 – 61. [Wang Shaoming. Preliminary study on climate, ecological environment and control countermeasures in agricultural areas in Eastern of Qinghai[J]. Qinghai Environment, 1989(3): 57 – 61.]

[26] 胡夏嵩,毛小青,朱海丽,等. 青藏高原植被护坡[M]. 北京:地质出版社, 2011. [Hu Xiasong, Mao Xiaoqing, Zhu Haili, et al. Slope Protection with Vegetation on Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.]

[27] 颜虹,徐勇勇,赵耐青. 单因素实验设计基本方法之二——完全随机区组设计[J]. 临床荟萃, 2011, 26(24): 1. [Yan Hong, Xu Yongyong, Zhao Naiqing. The basic method of single factor ex-

periment design:Completely randomized block design[J]. Clinical Focus,2011,26(24):1.]

[28] 南京水利科学研究院. 土工试验规程[M]. 北京:中华人民共和国水利水电出版社,1999:181 - 491.[Nanjing Hydraulic Research Institute. Specification of Soil Test[M]. Beijing:China Water Power Press,1999:181 - 491.]

[29] 林大仪. 土体学实验指导[M]. 北京:中国林业出版社,2004.[Lin Dayi. Pedology Experimental Guidance[M]. Beijing:China Forestry Publishing House,2004.]

[30] 侯贺贺. 黄河三角洲盐碱地生物措施改良效果研究[D]. 泰安:山东农业大学,2014:20 - 21.[Hou Hehe. Study of Improvement Effects by Biological Measures in The Yellow River Delta Saline-Alkali Soil[D]. Tai'an:Shandong Agricultural University,2014:20 - 21.]

[31] 张立宾,宋日荣,吴霞. 柽柳的耐盐能力及其对滨海盐渍土的改良效果研究[J]. 安徽农业科学,2008,36(13):5 424 - 5 426.[Zhang Libing,Song Rirong,Wu Xia,et al. Salt tolerance capability of *Tamarix chinensis* and the effects on the improvement of coastal saline soil[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2008,36(13):5 424 - 5 426.]

[32] 赵可夫,范海,江行玉,等. 盐生植物在盐渍土壤改良中的作用[J]. 应用与环境生物学报,2002,8(1):31 - 35.[Zhao Kefu,Fan Hai,Jiang Xingyu,et al. Improvement and utilization of saline soil by planting halophytes[J]. Chinese Journal Applied Environmental Biology,2002,8(1):31 - 35.]

[33] 陈德明. 盐渍环境中的植物耐盐性及其影响[J]. 土壤学进展,1994,22(5):22 - 29.[Chen Deming. Salt tolerance of plants in saline environment and its effects[J]. Progress in Soil Science,1994,22(5):22 - 29.]

[34] 王立艳,潘洁,肖辉,等. 不同耐盐植物对滨海盐土可溶性盐分运移的影响[J]. 中国农学通报,2012,28(20):250 - 254.[Wang Liyan,Pan Jie,Xiao Hui,et al. Effect of planting salt-tolerant plants on water-soluble salt in coastal saline soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2012,28(20):250 - 254.]

[35] 单娜娜,赖波,杨志莹,等. 准噶尔盆地西北缘不同盐生植物种植后土壤盐分变化研究[J]. 新疆农业科学,2016,53(12):2 314 - 2 320.[Shan Nana,Lai Bo,Yang Zhiying,et al. Study on changes of soil salinity after planting halophyte in Northwest of Junggar Basin[J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2016,53(12):2 314 - 2 320.]

[36] 黄丽萍,王立艳,杨勇,等. 四种耐盐植物根际土壤盐分运移特征研究[J]. 天津农业科学,2014,20(6):73 - 76.[Huang Liping,Wang Liyan,Yang Yong,et al. The characteristics of soil movement in coastal saline soil of four salt-tolerant plants[J]. Tianjin Agricultural Sciences,2014,20(6):73 - 76.]

[37] 张蛟,崔士友. 盐生植物和秸秆覆盖对滩涂极重度盐土养分和降盐效果的影响[J]. 南方农业学报,2018,49(1):56 - 61.[Zhang Jiao,Cui Shiyou. Effects of halophyte and straw mulching on soil nutrients and desalting in extreme saline soil of mud flat areas[J]. Journal of Southern Agriculture,2018,49(1):56 - 61.]

[38] 祁通,孙九胜,刘易,等. 滴灌条件下不同盐生植物对盐渍化土壤的脱盐效果研究[J]. 新疆农业科学,2011,48(12):2 309 - 2 314.[Qi Tong,Sun Jiusheng,Liu Yi,et al. Effects of different halophyte plants on soil desalination under drip irrigation conditions[J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2011,48(12):2 309 - 2 314.]

[39] 刘迁迁,苏里坦,刘广明,等. 伊犁河谷察南灌区土壤盐分空间变异研究[J]. 干旱区研究,2017,34(5):980 - 985.[Liu Qianqian,Su Litan,Liu Guangming. Spatial variation of soil salinity in the Chanan irrigated area in the Ili River Valley[J]. Arid Zone Research,2017,34(5):980 - 985.]

[40] 胡家帅,王振华,郑旭荣,等. 灌水处理对漫灌改滴灌红枣土壤盐分时空分布的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(1):312 - 319.[Hu Jiashui,Wang Zhenhua,Zheng Xurong,et al. Effect of different irrigation treatments on the spatial and temporal distribution in red Jujube's soil salt under the condition of changing flood irrigation into drip irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2018,32(1):312 - 319.]

[41] 王海霞,徐征和,庞桂斌,等. 微咸水灌溉对土壤水盐分布及冬小麦生长的影响[J]. 水土保持学报, 2017,31(3):291 - 297.[Wang Haixia,Xu Zhenghe,Pang Guibin,et al. Effect of brackish water irrigation on water-salt distribution and winter wheat growth[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(3):291 - 297.]

[42] 李文昊,王振华,郑旭荣,等. 新疆绿洲盐碱地滴灌条件下地下水局部动态对荒地盐分的影响[J]. 干旱区研究,2016,33(5):1 110 - 1 118.[Li Wenhao,Wang Zhenhua,Zheng Xurong,et al. Effects of local dynamic change of groundwater on soil salinity in wasteland under drip irrigation in saline or alkaline land of oasis in Xinjiang[J]. Arid Zone Research,2016,33(5):1 110 - 1 118.]

Soil Salt Reduction Effect of Four Herbaceous and Shrubby Species in the Xining Basin, Qinghai Province

LI Shu-xia[1,2,3], LIU Ya-bin[1,2,3], ZHONG Peng[4], YU Dong-mei[1,2], HU Xia-song[1,2,4], YANG You-qing[1,2,3]

(1. *Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining* 810008, *Qinghai, China*; 2. *Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Xining* 810008, *Qinghai, China*; 3. *Unversity of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; 4. *Qinghai University, Xining* 810016, *Qinghai, China*)

Abstract: In this study, two shrubby species *Caragana korshinskii* Kom. and *Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim. and two herbaceous species *Agropyron trachycaulum* and *Medicago sativa* L. adaptive to the natural conditions in the Xining Basin were screened out to experimentally plant in the Changling Gully in the basin. In the research area, the four species were planted by means of single planting and assembled planting. The contents and variations of eight soluble salts including K^+, Ca^{2+}, Na^+, Mg^{2+}, SO_4^{2-}, Cl^-, HCO_3^- and CO_3^{2-} in different soil layers and plant stems and roots under the two different planting conditions were discussed. The capabilities of two herbaceous and two shrubby species in reducing total salt content in slope soil were evaluated. The test results revealed that, under single planting of these four species, their effect in reducing the contents of SO_4^{2-}, Ca^{2+} and Na^+ was significant, and that of herbaceous and shrubby assemblage Ⅰ (*C. korshinskii* + *M. sativa* + *A. trachycaulum*) and assemblage II (*Z. xanthoxylon* + *M. sativa* + *A. trachycaulum*) in reducing the contents of SO_4^{2-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+ and Na^+ in slope soil was significant. The salt reduction effect of *M. sativa* was relatively more significant, and then that of *C. korshinskii* and *A. trachycaulu*, but that of *Z. xanthoxylon* was not significant. The salt reduction effect of the herbaceous and shrubby assemblage II was significantly higher than that of the herbaceous and shrubby assemblage I.

Key words: soil salt reduction; soluble salt ion; total salt content; single planting; herbaceous and shrubby assemblage; Xining Basin